第 37 卷第 24 期
2017 年 12 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.24
Dec.,2017

DOI: 10.5846/stxb201611082263
李子英,丛日春,杨庆山,周健.盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响.生态学报,2017,37(24):8511-8517.
Li Z Y, Cong R C, Yang Q S, Zhou J.Effects of saline-alkali stress on growth and osmotic adjustment substances in willow seedlings.Acta Ecologica Sinica, 2017,37(24):8511-8517.

盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响

李子英[1],丛日春[1,*],杨庆山[2],周 健[2]
1 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091
2 山东省林业科学研究院, 济南 250014

摘要:以盐柳 1 号为试验材料,将 2 种中性盐 NaCl、Na_2SO_4和 2 种碱性盐 $NaHCO_3$、Na_2CO_3,按不同比例混合成 A(NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3=1:2:1:0)、B(NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3=1:9:9:1)、C(NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3=1:1:1:1)3 种组合,设 4 个浓度梯度(50、100、150、200 mmol/L),模拟出 12 种盐度和碱度各不相同的盐碱条件,对盐柳 1 号幼苗进行处理,测定了株高生长量、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量 4 项指标。结果表明:随着盐浓度的增大和碱性盐比例的增高,盐柳 1 号幼苗的株高生长量呈降低趋势,叶片 MDA、脯氨酸和可溶性糖含量则有不同程度的升高。A、B、C 处理组的株高生长量在盐浓度 200 mmo/L 时分别相对 CK 降低了 61.32%、68.67%、73.02%,差异均达到显著水平(P<0.05)。A 处理组(pH 值为 8.04),随着盐浓度的增大,叶片 MDA、脯氨酸和可溶性糖含量升高趋势不明显;B 处理组(pH 值为 8.66),叶片 MDA 含量在盐浓度超过 100 mmol/L 时呈显著升高趋势,脯氨酸和可溶性糖含量在盐浓度超过 150 mmol/L 时急剧增加;C 处理组(pH 值为9.47),盐浓度大于 150 mmol/L 时,盐柳 1 号幼苗的叶片全部枯黄。综合分析结果表明,在混合盐碱胁迫下,盐柳 1 号幼苗的生长受到了不同程度的抑制;盐柳 1 号可以耐受不超过 100 mmol/L 的 3 种组分盐碱胁迫,且盐浓度> 150 mmol/L、pH > 9.51 的盐碱条件不适宜盐柳 1 号的生长。

关键词:盐碱胁迫;盐柳 1 号;生长;渗透调节物质

Effects of saline-alkali stress on growth and osmotic adjustment substances in willow seedlings

LI Ziying[1], CONG Richun[1,*], YANG Qingshan[2], ZHOU Jian[2]
1 *Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*
2 *Shandong Forestry Research Institute, Ji'nan* 250014, *China*

Abstract: Previous studies on response to salt stress in willows have focused mainly on the physiological response to single-salt stress; however, response to complex saline-alkali stress in willows has rarely been reported. The present study explored the physiological resistance characteristics of willow under complex saline-alkali stress, to provide a theoretical basis for willow cultivation in saline-alkali soils. The effects of complex saline-alkali stress on growth and osmotic adjustment substances were studied using willow (*Salix psammophila* 'Yanliu NO. 1') seedlings. The seedlings were treated with 12 types of saline-alkali stress with different salinity and alkalinity levels, simulated by two neutral salts (NaCl and Na_2SO_4) and two alkali salts ($NaHCO_3$ and Na_2CO_3) mixed in various proportions [A (NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3 = 1:2:1:0), B (NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3 = 1:9:9:1), and C (NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3 = 1:1:1:1)] and concentrations (50, 100, 150, and 200 mmol/L). Under these conditions, plant height increment and malondialdehyde (MDA), free proline, and soluble sugar content in leaves were measured. The results showed that salt concentration was the main factor

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2016MA011)
收稿日期:2016-11-08; **网络出版日期**:2017-08-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: congrichun888@163.com

driving growth in Yanliu NO. 1. With increasing salt concentration and proportion of alkaline salts, plant height increment of Yanliu NO. 1 showed a decreasing trend, whereas the leaf MDA, proline, and soluble sugar content increased in different degrees. At 200 mmol/L, plant height increment under treatments A, B, and C was significantly lower ($P < 0.05$) than that under the control treatment (CK, 0 mmol/L), by 61.32%, 68.67%, and 73.02%, respectively. The leaf content of MDA, proline and soluble sugar in Yanliu NO. 1 did not differ significantly with increasing salt concentration under treatment A (pH 8.04). Under treatment B (pH 8.66), the leaf MDA content showed a significantly increasing trend at salinity > 100 mmol/L, whereas the leaf content of proline and soluble sugar increased considerably at salinity > 150 mmol/L. Under treatment C (pH 9.47), the leaf content of MDA, proline and soluble sugar showed a small variation at salinity of 100 mmol/L, whereas the leaves withered at salinity > 150 mmol/L. The results of this comprehensive analysis indicated that (1) the growth of *S. psammophila* 'Yanliu NO. 1' was subject to different degrees of inhibition under complex saline-alkali stress, (2) *S. psammophila* 'Yanliu NO. 1' could not tolerate stress at concentrations > 100 mmol/L of the three mixed saline-alkali solutions, and (3) the saline-alkali condition with salinity > 150 mmol/L and pH > 9.51 was not suitable for the growth of *S. psammophila* 'Yanliu NO. 1'.

Key Words: saline-alkali stress; *Salix psammophila* 'Yanliu NO. 1'; growth; osmotic adjustment substances

土壤盐碱化是限制植物生长和生产的重要因素[1-2]。种植适应盐碱地生长的植物是治理盐碱、改善盐碱地区生态环境的有效措施。以往的盐胁迫研究主要以单盐作为胁迫盐,但就我国而言,大面积的盐碱地中,除新疆和松花江部分地区土壤以硝酸盐为主外,其他地区主要是含有 Na^+、K^+、Mg^{2+} 的 3 种阳离子和 CO_3^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-} 的 4 种阴离子的复合盐碱地,所含盐分复杂,盐化与碱化往往相伴发生[3],生态破坏力也比单独的中性盐更大。因此,混合盐碱胁迫是实际存在的主要问题。根据这一现状,人们将 NaCl、Na_2SO_4、$NaHCO_3$、Na_2CO_3按不同比例混合,人工模拟混合盐碱胁迫条件,对燕麦[4]、绿豆[5]、红砂[6]、桑树[7]、甜瓜[8]、向日葵[9]等多种植物展开了研究。盐胁迫和碱胁迫是两种不同性质的胁迫。在混合盐碱胁迫中,既有盐胁迫也有碱胁迫,二者间具有协同效应。碱胁迫强度较低时盐胁迫起主导作用,碱胁迫强度较高时碱胁迫起主导作用。其中缓冲量和盐度是复杂盐碱条件对植物胁迫作用的主导因素[10-13]。王晨等[14]发现,随着胁迫强度的增加,甜高粱幼苗茎叶鲜重呈下降趋势,相对电导率和脯氨酸含量均呈上升趋势,而 SOD 活性则表现出先升后降趋势。刘晓静等[15]研究表明,随着盐浓度的升高,紫花苜蓿幼苗叶绿素含量呈先增加后减少趋势。闫艳华等[16]指出,随着盐 pH 的升高,番茄幼苗受害加重,MDA 含量增加,SOD、POD 活性呈先升高后降低趋势。

柳树为杨柳科柳属(*Salix*)植物,其树干高大通直,生长快,寿命长,材质优,抗性强,既是重要的园林绿化植物,也是用材林和农田防护林的常用树种[17]。目前,关于柳树耐盐性的研究主要以中性盐 NaCl 胁迫[18]和碱性盐 Na_2CO_3、$NaHCO_3$ 胁迫[19-20]为主,而其对于混合盐碱胁迫的响应研究较少。"盐柳 1 号"(*Salix psammophila* 'Yanliu NO. 1')来源于内蒙古沙漠地带的灌木北沙柳,是山东省林业科学研究院经过十多年的研究和选育,从中选育出的一个乔木品种。本研究将 NaCl、Na_2SO_4、$NaHCO_3$、Na_2CO_3按不同比例混合,模拟出 12 种盐度和碱度各不相同的盐碱条件,对盐柳 1 号盆栽幼苗进行处理,研究混合盐碱胁迫对盐柳 1 号幼苗生长和渗透调节物质含量的影响,以探索盐柳 1 号的耐盐碱范围和耐盐碱生理特性。

1 材料与方法

1.1 材料培养

试验材料为柳树无性系"盐柳 1 号"(山东省林业科学研究院提供),取长 15 cm、直径 1 cm 左右的柳树当年生插条,于 2016 年 3 月份定植于口径和高均为 15 cm 的塑料花盆内,栽培基质为洗净的河沙和适量珍珠岩,并用多菌灵进行消毒。每盆 1 株,每 3 盆一组作为 3 个重复。扦插定植后,用 1/2Hogland 营养液进行浇灌

并在温室内培养,温室内的昼夜温度为 25/18℃。培养 45 d 后,选取长势相对一致的柳树幼苗进行试验。

1.2 模拟盐碱设计

将 2 种中性盐 NaCl、Na_2SO_4和 2 种碱性盐 $NaHCO_3$、Na_2CO_3按不同比例混合,按碱性盐比例逐渐增大的顺序分成 3 个处理组(分别用 A、B、C 表示)。每组内设 4 个浓度梯度(分别用 1、2、3、4 表示),其混合盐总浓度依次为 50、100、150、200 mmol/L,其中 A_1表示 A 处理组浓度为 50 mmol/L 的处理,依此类推。共模拟出 12 个混合盐碱组合。从表 1 可以看出,组内 pH 值的变化明显小于组间,因此分析数据时以同组各浓度 pH 值的平均值作为该组的 pH 值,所以 A、B、C 处理组的 pH 值分别为 8.04、8.66、9.47。

表 1 各处理液的盐分组成、摩尔比及相应的 pH 值

Table 1 Salt composition, molar ratio and corresponding pH of solutions of each treatments

处理组 Treatment group	盐分组成与摩尔比 Salt composition and molar ratio				各盐浓度(mmol/L)处理组对应的 pH pH values corresponding to various salinity treatments (mmol/L)				
	NaCl	Na_2SO_4	$NaHCO_3$	Na_2CO_3	0	50	100	150	200
CK	0	0	0	0	6.87	—	—	—	—
A	1	2	1	0	—	7.91	8.01	8.09	8.16
B	1	9	9	1	—	8.47	8.62	8.71	8.84
C	1	1	1	1	—	9.33	9.47	9.51	9.56

"A"表示按 NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3 = 1:2:1:0 比例配成混合盐溶液的处理组;"B"表示按 NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3 = 1:9:9:1 比例配成混合盐溶液的处理组;"C"表示按 NaCl:Na_2SO_4:$NaHCO_3$:Na_2CO_3 = 1:1:1:1 比例配成混合盐溶液的处理组

1.3 盐碱胁迫

选 13 组长势相对一致的柳树幼苗,1 组浇 1/2Hogland 营养液作为对照,其余 12 组进行 A_1—A_4、B_1—B_4、C_1—C_4的编号,分别用含有相应浓度的混合盐溶液进行胁迫处理,处理间隔为 3 d,每次浇 100 mL/盆。为避免盐冲击现象,胁迫处理时盐浓度每次增加 50 mmol/L,直至达到设定浓度。处理期间,定期定量补水。胁迫处理 14 d 后采集柳树幼苗相应部位的功能叶片进行指标测定。

1.4 指标测定

1.4.1 株高生长量的测定

测定胁迫前后各处理组柳树幼苗的株高 H_1和 H_2,株高生长量=胁迫后的株高 H_2-胁迫前的株高 H_1。

1.4.2 丙二醛(MDA)含量的测定[21]

称取 0.5 g 植物样品,先加 10%三氯乙酸(TCA)2 mL,研磨匀浆后再加入 3 mL TCA 进一步研磨,研磨后所得匀浆在 3000 r/min 下离心 10 min,取所得上清液 2 mL 于带塞玻璃试管中,加入 0.5%硫代巴比妥酸(TBA)溶液 2 mL,混合后于沸水浴上反应 20 min,迅速冷却后离心,上清液分别于 532、600、450 nm 波长下测定吸光度值。对照管以 2 mL 蒸馏水代替提取液。

1.4.3 脯氨酸含量的测定[22]

称取 0.5 g 植物样品置带塞玻璃试管中,加入 5 mL 3%磺基水杨酸溶液,在沸水浴中提取 10 min(提取过程中要经常摇动),冷却后过滤于干净的试管中,滤液即为脯氨酸的提取液。吸取 2 mL 提取液于另一干净的带塞玻璃试管中,加入 2 mL 冰醋酸及 2 mL 酸性茚三酮试剂,在沸水浴中加热 30 min,溶液即呈红色。冷却后加入 4 mL 甲苯,摇荡 30 s,取上层液在 3000 r/min 下离心 5 min。轻轻吸取上层脯氨酸红色甲苯溶液于比色皿中,以甲苯为对照,在 520 nm 波长处比色,求得吸光度值。

1.4.4 可溶性糖含量的测定[22]

称取 0.3 g 植物样品,剪碎,放入带塞玻璃试管中,加入 10 mL 蒸馏水,于沸水中提取 30 min(提取 2 次),提取液过滤入 25 mL 容量瓶中,反复漂洗试管及残渣,定容至刻度。吸取样品提取液 0.5 mL 于 20 mL 刻度试管中,加蒸馏水 1.5 mL,然后向试管中加入 0.5 mL 蒽酮乙酸乙酯试剂和 5 mL 浓硫酸,充分震荡,立即将试管

放入沸水浴中,逐管均保温 1 min,取出后自然冷却至室温,以空白作参比,在 630 nm 波长下测定吸光度值。

1.5 数据处理

运用 Excel 2016、SPSS 19.0 对试验数据进行处理和分析,采用单因素方差分析对不同盐浓度和不同 pH 值下各生理指标的差异性进行显著性分析,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对柳树幼苗株高生长量的影响

衡量植物耐盐性最直接的指标就是盐胁迫后植株的高度,它是体内各种代谢反应的综合表现[23]。在混合盐碱胁迫下,盐柳 1 号幼苗的生长受到了不同程度的抑制。如图 1 所示,随着盐浓度的增大,A、B、C 处理组的株高生长量均呈降低趋势,且均显著低于 CK($P<0.05$),并在盐浓度 200 mmol/L 时均降至最小值。其中,A 处理组的株高生长量相对 CK 依次降低了 27.20%、45.48%、53.18%、61.32%;B 处理组的株高生长量与 CK 相比依次降低了 29.65%、46.82%、63.77%、68.67%;C 处理组幼苗的株高生长量与 CK 相比依次降低了 31.22%、55.96%、66.33%、73.02%,且在盐浓度高于 150 mmol/L 时叶片全部枯黄。在同等盐浓度条件下,随着碱性盐比例(pH 值)的增高,盐柳 1 号幼苗的株高生长量均呈降低趋势。在盐浓度 50、100 和 150 mmol/L 时,A、B、C 处理组的株高生长量差异均不显著($P>0.05$)。

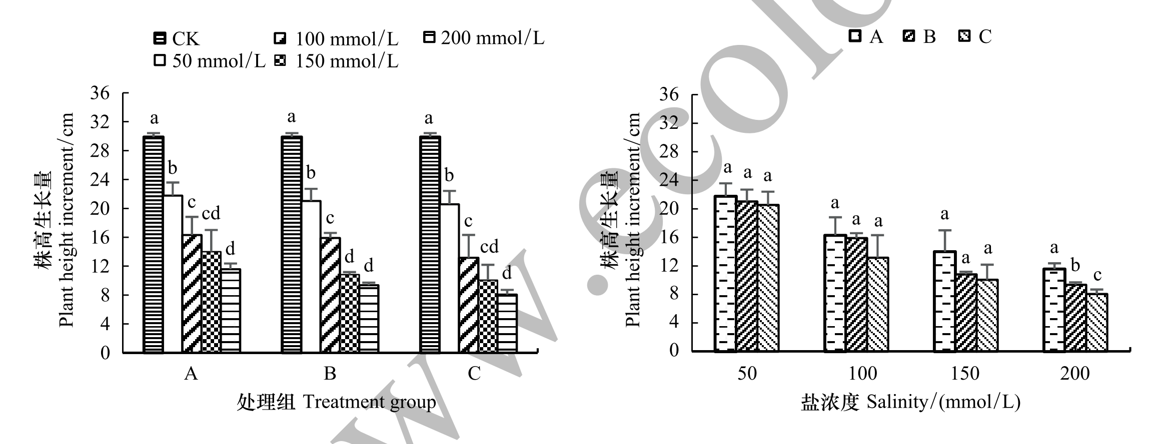


图 1 混合盐碱胁迫对柳树幼苗株高生长量的影响

Fig.1 Effect of complex saline-alkali stress on plant height increment of willow seedlings

"A"表示按 NaCl∶Na_2SO_4∶$NaHCO_3$∶Na_2CO_3 = 1∶2∶1∶0 比例配成混合盐溶液的处理组;"B"表示按 NaCl∶Na_2SO_4∶$NaHCO_3$∶Na_2CO_3 = 1∶9∶9∶1 比例配成混合盐溶液的处理组;"C"表示按 NaCl∶Na_2SO_4∶$NaHCO_3$∶Na_2CO_3 = 1∶1∶1∶1 比例配成混合盐溶液的处理组;不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

2.2 盐碱胁迫对柳树幼苗叶片丙二醛(MDA)含量的影响

盐碱胁迫下植物体内氧自由基代谢失衡,细胞膜受到活性氧攻击产生膜质过氧化,最终细胞膜的结构和功能遭到破坏。如图 2 所示,随着盐浓度的增大,A、B、C 处理组的 MDA 含量均呈整体升高趋势,且均高于或显著高于 CK。其中,A 处理组的 MDA 含量增幅较小,与 CK 相比差异均不显著($P>0.05$);B 处理组的 MDA 含量在盐浓度大于 100 mmol/L 时开始显著增加($P<0.05$);C 处理组的 MDA 含量均显著高于 CK($P<0.05$)。A、B 处理组的 MDA 含量在盐浓度 200 mmol/L 时均达到最大值,分别相对 CK 增加了 23.82%、154.29%;C 处理组的 MDA 含量在盐浓度 100 mmol/L 时达到最大值,与 CK 相比显著增加了 41.83%($P<0.05$)。在盐浓度 50 mmol/L 时,A、B、C 处理组的 MDA 含量差异均不显著($P>0.05$)。

2.3 盐碱胁迫对柳树幼苗叶片脯氨酸含量的影响

游离脯氨酸是一种可溶性蛋白,与水具有极强的吸附性,是参与植物渗透调节的主要物质之一。如图 3 所示,随着盐浓度的增大,A、B、C 处理组的游离脯氨酸有不同程度的积累。其中,A、C 处理组的脯氨酸含量

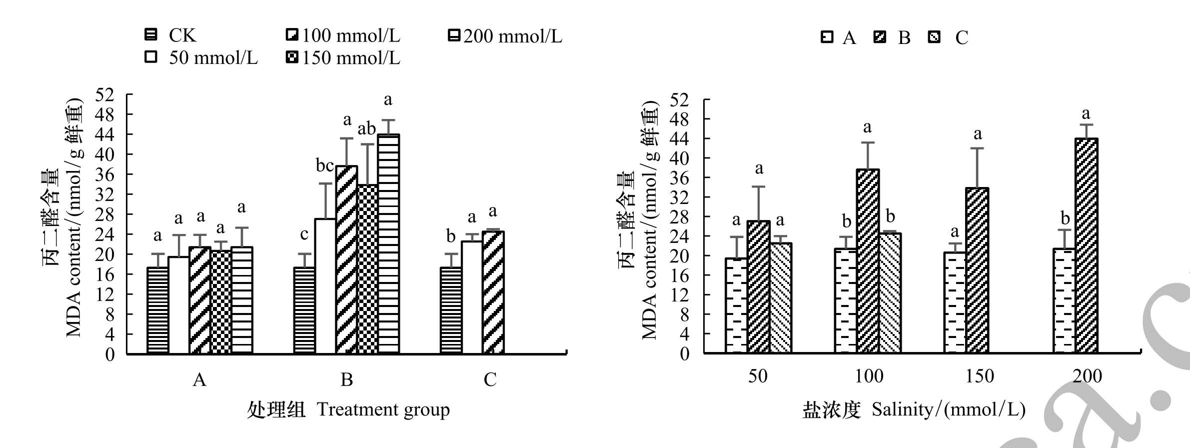


图 2　混合盐碱胁迫对柳树幼苗叶片丙二醛含量的影响

Fig.2　Effect of complex saline-alkali stress on MDA content in leaves of willow seedlings

均呈先升高后降低趋势,且分别在盐浓度 150、50 mmol/L 时达到最大值,分别相对 CK 增加了 72.58%、14.66%;B 处理组的脯氨酸含量在盐浓度 150 mmol/L 时达到最大值,与 CK 相比显著增加了 158.75%(*P*<0.05)。从整体来看,A、C 处理组的脯氨酸含量增幅较小,与 CK 相比差异均不显著(*P*>0.05);B 处理组的脯氨酸含量在 100 mmol/L 以下盐浓度范围内增加缓慢,而在高盐胁迫下骤然增加。在同等盐浓度条件下,A、B、C 处理组的脯氨酸含量差异均不显著(*P*>0.05)。

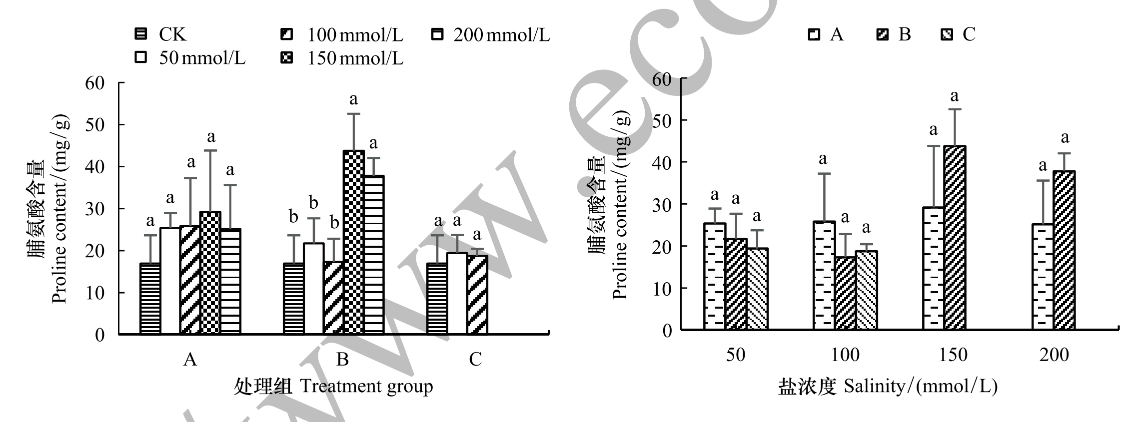


图 3　混合盐碱胁迫对柳树幼苗叶片脯氨酸含量的影响

Fig.3　Effect of complex saline-alkali stress on proline content in leaves of willow seedlings

2.4　盐碱胁迫对柳树幼苗叶片可溶性糖含量的影响

随着盐浓度的增大,A、B、C 处理组的叶片可溶性糖含量呈间断性积累(图 4)。其中,A 处理组的叶片可溶性糖含量呈先升高后降低趋势,与 CK 相比差异均不显著(*P*>0.05),并在盐浓度 100 mmol/L 时达到最大值,相对 CK 增加了 35.25%;B 处理组的可溶性糖含量在盐浓度 150 mmol/L 时开始显著增加,在盐浓度 200 mmol/L 时达到最大值,与 CK 相比显著增加了 313.99%(*P*<0.05);C 处理组的叶片可溶性糖含量均显著高于 CK(*P*<0.05),且在盐浓度 100 mmol/L 时达到最大值,与 CK 相比显著增加了 48.45%(*P*<0.05)。在盐浓度 50 mmol/L 时,A、B、C 处理组的可溶性糖含量差异均不显著(*P*>0.05)。

2.5　胁变指标与盐浓度和 pH 值的方差分析

方差分析表明(表 2),不同盐浓度和盐组合(pH 值)以及两者间的交互作用对盐柳 1 号幼苗的叶片 MDA 含量和可溶性糖含量的影响均达到极显著(*P*<0.01);不同盐浓度对株高生长量和脯氨酸含量的影响均达极显著水平(*P*<0.01);不同 pH 值对株高生长量的影响达到极显著(*P*<0.01),对脯氨酸含量的影响不显著(*P*>0.05);交互作用对株高生长量和脯氨酸含量的影响均不显著(*P*>0.05)。盐浓度对各胁变指标的影响明显大

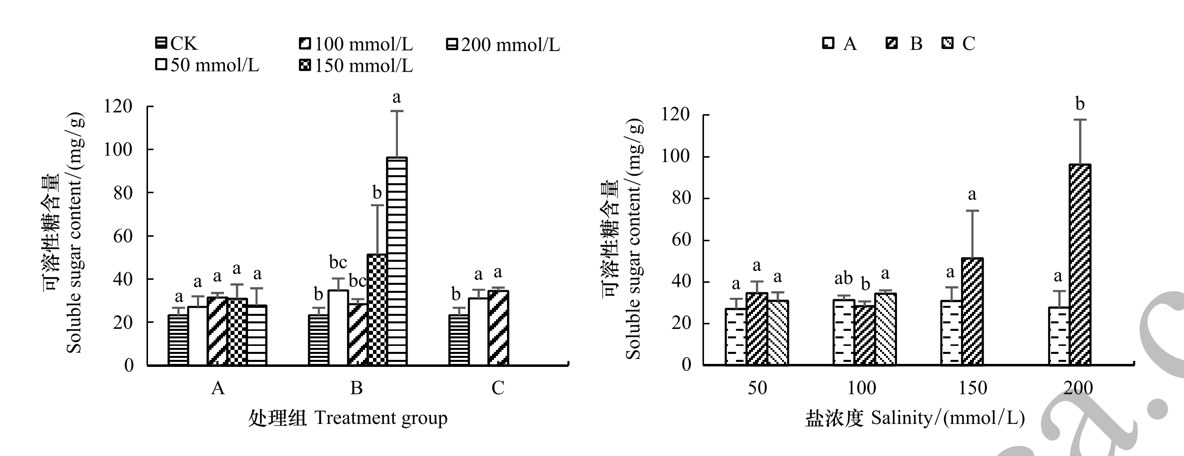


图 4 混合盐碱胁迫对柳树幼苗叶片可溶性糖含量的影响

Fig.4 Effect of complex saline-alkali stress on soluble sugar content in leaves of willow seedlings

于 pH 值的影响。

表 2 盐浓度和 pH 值及其交互作用对柳树幼苗不同胁变指标的影响

Table 2 Effect of salinity, pH and their interaction effects on different strain indexes of willow seedlings

胁变指标 Strain index	盐浓度 Salinity		pH		盐浓度× pH Salinity × pH	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
株高生长量 Plant height increment	215.506	0.000 **	7.441	0.002 **	1.018	0.444 NS
丙二醛含量 MDA content	13.061	0.000 **	31.349	0.000 **	4.509	0.003 **
脯氨酸含量 Proline content	6.118	0.001 **	0.828	0.448 NS	1.753	0.149 NS
可溶性糖含量 Soluble sugar content	15.241	0.000 **	14.132	0.000 **	9.220	0.000 **

"＊"表示差异显著, $P<0.05$ (＊: significant difference $P<0.05$); "＊＊"表示差异极显著, $P<0.01$ (＊＊: significant difference $P<0.01$); "NS"表示差异不显著, $P>0.05$ (NS: not significant)

3 讨论与结论

植物在环境胁迫下生长会受到抑制,混合盐碱胁迫对植物生长的影响尤为显著[24]。本研究中,在混合盐碱胁迫下,盐柳 1 号幼苗的生长受到了不同程度的抑制。A、B、C 处理组的株高生长量随着盐浓度、pH 值的递增均呈降低趋势,尤其是在碱性盐比例较高的 C 处理组(pH 值为 9.47),在高盐胁迫下盐柳 1 号幼苗的叶片全部枯黄(C_3、C_4)。这说明在混合盐碱胁迫下,盐柳 1 号幼苗不仅受到盐浓度的影响,而且还受到高 pH 的协同作用,这与李玉梅在牛叠肚幼苗上的研究结果类似[25]。

植物遭受逆境胁迫时细胞膜首先会受到伤害,丙二醛(MDA)是植物膜脂过氧化的产物,MDA 含量越高,说明植物受伤害的程度越大[26]。闫永庆等[27]研究表明,随着盐、碱浓度的加大,白刺叶片质膜所受伤害逐渐增大,MDA 含量增加。本研究中,在混合盐碱胁迫下,盐柳 1 号幼苗的叶片 MDA 含量随着盐浓度的增大有不同程度的增加,这表明氧自由基已诱发膜脂过氧化,细胞膜受到不同程度的伤害。其中,A 处理组的 MDA 含量增加幅度不大,说明盐柳 1 号幼苗叶片质膜受伤害程度不大;B 处理组的 MDA 含量在盐浓度高于 100 mmol/L 时骤然增加,说明盐柳 1 号幼苗叶片膜质过氧化程度加剧,植株受害加重;C 处理组幼苗在盐浓度高于 150 mmol/L 时叶片全部枯黄,说明盐柳 1 号幼苗已失去对盐碱胁迫的应激能力。

盐胁迫会造成植物渗透胁迫、膨压丧失[28],植物体通过增加渗透调节物质来增大细胞质浓度,以平衡液泡和细胞质的水势,平衡渗透势,防止液泡从细胞质中吸水,避免细胞质这个代谢中心受到影响[29-31]。脯氨酸和可溶性糖是植物体内重要的渗透调节物质,郝凤等[32]研究发现,随着盐碱胁迫浓度的增大,植物体在积累脯氨酸的同时,糖的合成也增加。本研究中,随着盐浓度的增大,盐柳 1 号幼苗的叶片脯氨酸和可溶性糖含量均有所上升。在低盐胁迫下(100 mmol/L 以下),A、B、C 处理组的脯氨酸和可溶性糖含量变化均不明显;

在高盐胁迫下(150 mmol/L 以上),A 处理组的脯氨酸和可溶性糖含量增加不显著,B 处理组的脯氨酸和可溶性糖含量骤然增至最大值,C 处理组幼苗的叶片全部枯黄。说明盐柳 1 号幼苗对混合盐碱胁迫具有一定的耐受性,当超过耐受范围时植株大量积累脯氨酸和可溶性糖,以此来缓解盐碱胁迫带来的伤害,直至承受不住高盐高碱的胁迫作用而死。

混合盐碱胁迫并不是盐、碱两种胁迫的简单叠加,而是有一定协同效应[33]。本研究中,在低盐度时(50 mmol/L),pH 值虽然由 7.91 增至 9.33,但叶片 MDA 含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量的变化均不明显,说明单纯碱胁迫作用较小;在低碱度时(A 组),虽然盐浓度由 50 mmol/L 增至 200 mmol/L,但叶片 MDA 含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量的增加幅度不大,说明单纯盐胁迫作用也较小。而当盐胁迫与碱胁迫共同作用时(C_3、C_4),盐柳 1 号幼苗的叶片全部枯黄,说明盐与碱的协同效应会对植物造成更大的伤害。

本研究结果表明,在高盐低碱或高碱低盐的条件下盐柳 1 号幼苗可以正常生长,盐浓度低于 100 mmol/L 的混合盐碱胁迫对盐柳 1 号的生理变化影响不大;盐浓度高于 150 mmol/L,pH > 9.51 时会对盐柳 1 号造成较大的伤害。

参考文献(References):

[1] 何磊, 陆兆华, 管博, 赵艳云, 王睿彤, 刘洋. 盐碱胁迫对甜高粱种子萌发及幼苗生长的影响. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 67-71.
[2] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(3): 324-349.
[3] 赵可夫. 植物抗盐生理. 北京: 中国科技出版社, 1993.
[4] 杨科, 张保军, 胡银岗, 王淑华, 薛晓峰. 混合盐碱胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生理生化特性的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 188-192.
[5] 殷丽华, 徐鹏, 柯希望, 王志辉, 张盼盼, 宋大巍, 刁静静, 郑殿峰, 左豫虎. 混合盐碱胁迫对绿豆种子萌发与幼苗生长发育的影响. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(5): 40-43.
[6] 陈金元, 陈学林, 满吉琳, 郭楠楠. 混合盐碱胁迫对红砂种子萌发的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(5): 113-119.
[7] 丁俊男, 迟德富. 混合盐碱胁迫对桑树种子萌发和根系生长的影响. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 78-82.
[8] 吴旭红, 陈晓娥. 盐碱胁迫对甜瓜种子萌发期氮代谢及渗透调节能力的影响. 种子, 2015, 34(12): 89-93.
[9] 郭园, 张玉霞, 杜晓艳, 于华荣, 刘涛. 盐碱胁迫对油用向日葵幼苗生长及含水量的影响. 东北农业科学, 2016, 41(2): 20-24.
[10] 石德成, 盛艳敏, 赵可夫. 不同盐浓度的混合盐对羊草苗的胁迫效应. 植物学报, 1998, 40(12): 1136-1142.
[11] 石德成, 盛艳敏, 赵可夫. 复杂盐碱生态条件的人工模拟及其对羊草生长的影响. 草业学报, 1998, 7(1): 36-41.
[12] 石德成, 李玉明, 杨国会, 李毅丹, 赵可夫. 盐碱混合生态条件的人工模拟及其对羊草胁迫作用因素分析. 生态学报, 2002, 22(8): 1323-1332.
[13] 石德成, 盛艳敏, 赵可夫. 复杂盐碱条件对向日葵胁迫作用主导因素的实验确定. 作物学报, 2002, 28(4): 461-467.
[14] 王晨, 陈吉宝, 庞振凌, 李南南, 董海鸿, 李丹丹. 甜高粱对混合盐碱胁迫的响应及耐盐碱种质鉴定. 作物杂志, 2016, (1): 56-61.
[15] 刘晓静, 张晓磊, 齐敏兴, 刘艳楠. 混合盐碱对紫花苜蓿种子萌发及幼苗期叶绿素荧光特性的影响. 草地学报, 2013, 21(3): 501-507.
[16] 闫艳华, 杜京旗, 高晓丽. 碱性复合盐胁迫对番茄幼苗生理的影响. 黑龙江农业科学, 2015, (12): 82-83.
[17] 王宁, 周晓星, 刘俊祥, 巨关升, 韩蕾, 孙振元. 盐胁迫对柳树无性系 SH31 离子含量及光合作用的影响. 林业科学研究, 2015, 28(4): 565-569.
[18] 隋德宗, 王保松, 王伟伟. 盐胁迫对灌木柳 2 个无性系渗透调节物质含量的影响. 江苏林业科技, 2014, 41(6): 1-3, 20-20.
[19] 刘铎, 丛日春, 党宏忠, 李庆梅, 刘德玺, 杨庆山. 柳树幼苗渗透调节物质对中、碱性钠盐响应的差异性. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1531-1535.
[20] 吴薇, 高捍东, 魏树强. 水培盐碱胁迫对杂交新美柳生根特性的影响. 林业科技开发, 2008, 22(3): 32-34.
[21] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
[22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2001.
[23] 王保平, 董晓燕, 董宽虎. 盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响. 草地学报, 2013, 21(6): 1124-1129.
[24] 盛彦敏, 石德成, 肖洪兴, 许月. 不同程度中碱性复合盐对向日葵生长的影响. 东北师大学报: 自然科学版, 1999, (4): 65-69.
[25] 李玉梅. 牛叠肚幼苗对盐碱胁迫的生理响应机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
[26] 张永平, 陈幼源, 陈绯翔. 盐碱胁迫对甜瓜种子萌发的影响. 上海农业学报, 2009, 25(4): 22-25.
[27] 闫永庆, 刘兴亮, 王崑, 樊金萍, 石溪婵. 白刺对不同浓度混合盐碱胁迫的生理响应. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1213-1219.
[28] 刘斌, 张文辉, 马闯, 刘新成. 不同能源柳无性系对 NaCl 胁迫的生理响应. 生态学报, 2010, 30(4): 895-904.
[29] 王秀娟, 杨会青. 盐碱胁迫下西伯利亚白刺的渗透调节物质的变化. 热带农业科学, 2010, 30(2): 34-36.
[30] 闫永庆, 王文杰, 朱虹, 石溪婵, 刘兴亮, 祖元刚. 混合盐碱胁迫对青山杨渗透调节物质及活性氧代谢的影响. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2085-2091.
[31] 肖强, 郑海雷, 陈瑶, 黄伟滨, 朱珠. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响. 生态学杂志, 2005, 24(4): 373-376.
[32] 郝凤, 刘晓静, 张晓磊, 齐敏兴. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿苗期氮磷吸收及生理特性的影响. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1268-1274.
[33] 吴薇, 高捍东, 蔡伟建. 盐碱胁迫和 NO 处理对杂交新美柳根系活力的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 59-62.